

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК 548.55; 681.7.068.2; 535-15

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
\_\_\_\_\_ Кружаев В.В.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития  
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:  
Разработка одномерных (1D) и двумерных (2D) структур ИК-световодов с запрещенными зонами  
для обнуляющей интерферометрии  
(Заключительный)

Зав.кафедрой

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Марков В.Ф.

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Жукова Л.В.

Исполнитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Врублевский Д.С.

Екатеринбург 2013

## Реферат

1. ФИО автора (ов): Врублевский Дмитрий Станиславович/ Dmitry S. Vrublevsky.

2. Аннотация:

Смоделированы, получены и изучены фотонно-кристаллические инфракрасные световоды для работы в одномодовом режиме. Исследована схема их применения в качестве модовых фильтров в схеме обнуляющей интерферометрии. Обозначены их преимущества перед другими видами световодов.

Photonic crystal infrared fibers for single-mode operation were simulated, obtained, and investigated. Their application as modal filters in nulling interferometry schemes was explored, and their advantages over other kinds of fibers were also indicated.

3. Ключевые слова: инфракрасные световоды, твердые растворы галогенидов серебра и таллия (I), обнуляющая интерферометрия, компьютерное моделирование / infrared fibers, silver and thallium (I) halide solid solutions, nulling interferometry, computer simulation

4. Тема отчета: Разработка одномерных (1D) и двумерных (2D) структур ИК-световодов с запрещенными зонами для обнуляющей интерферометрии / One- (1D) and two-dimensional (2D) IR fiber bandgap structure developing for nulling interferometry.

# Содержание

Обозначения и сокращения	4
Введение	5
1. Принцип обнуляющей интерферометрии	5
2. Моделирование ИК-световодов	7
2.1. Моделирование 1D-фотонных структур	8
2.2. Моделирование 2D-фотонных структур	9
3. Экструзия и исследование свойств ИК-световодов	11
Заключение	12
Список использованных источников	13

## **Обозначения и сокращения**

1D – одномерный

2D – двумерный

CCD – прибор с зарядовой связью

clad – обозначение оболочки 1D-световода

core – обозначение сердцевины 1D-световода

eff – обозначение эффективного показателя преломления/ диаметра

i – обозначение вставок 2D-световода

L2 – вторая точка Лагранжа

mat – обозначение матрицы 2D-световода

SMTP – Source-Model Technique Package

WM – Wolfram Mathematica

ИК – инфракрасный

ПП – показатель преломления

ФЗЗ – фотонная запрещенная зона

## **Введение**

В наше время в области волоконной оптики существует необходимость расширения спектрального диапазона, в котором работают световоды, в частности, до средней инфракрасной (ИК) области (2,5-25,0 мкм). Это обусловлено наличием ряда перспективных применений – инфракрасная спектроскопия, пирометрия, волоконные лазеры, космические исследования и другие. Давно известны такие материалы световодов, как твердые растворы галогенидов таллия (I) [1] и серебра [2,3], которые являются единственными кристаллическими материалами, пропускающими в среднем ИК-диапазоне спектра, для которого и разрабатываются вышеперечисленные применения. Однако обе системы имеют недостатки: световоды на основе первой системы со временем деградируют вследствие рекристаллизации и спайности, а волокна на основе второй системы обладают ощутимой светочувствительностью, что также приводит к ухудшению их оптических свойств со временем. Коллективом кафедры физической и коллоидной химии разрабатываются системы на основе твердых растворов систем AgBr-TlI, AgCl-AgBr-AgI(TlI) [4-6], прозрачных во всем среднем ИК-диапазоне (от 2 до 30-40 мкм в зависимости от содержания иодида таллия) и обладающих всеми преимуществами индивидуальных систем – большой фотостойкостью, малыми оптическими потерями, сцинтилляционными свойствами [7].

В данной работе проводится моделирование ИК-световодов указанных составов и простейших фотонных структур, получение и исследование некоторых из них, а также обсуждение возможности применимости этих структур в качестве рабочего элемента в обнуляющей интерферометрии – перспективном направлении использования световодов для прямого поиска планет, в том числе подобных Земле по температуре поверхности и/или составу атмосферы.

## **1. Принцип обнуляющей интерферометрии**

Вследствие того, что яркость звезды намного превышает яркость гипотетической планеты, прямое визуальное обнаружение и наблюдение последней, а тем более картографирование и определение состава ее атмосферы невозможны.

Из ныне используемых методов обнаружения планет вне Солнечной Системы абсолютное большинство является косвенными. Это метод Доплера, транзитный метод, метод гравитационного микролинзирования, астрометрический метод и некоторые другие. Единственным прямым методом является «схема нуллера» - метод обнуляющей интерферометрии, позволяющий уже не косвенно определить состав атмосферы, температуру и другие характеристики, связанные с длиной волны излучения планеты. Обнуляющая интерферометрия позволяет за счет особой комбинации сигналов нескольких телескопов убрать сильные источники света - излучение

звезд - и оставить близлежащие слабые сигналы от планет, подобных Земле. Средней температуре Земли, равной 300 К, соответствует длина волны излучения 10,6 мкм, характерная и для землеподобных планет вследствие их сходства с Землей с точки зрения состава и наличия атмосферы, альбедо, теплового эффекта внутренних химических реакций и тепла, вырабатываемого в ходе жизнедеятельности гипотетической биомассы. Эта длина волны способна проходить с малыми потерями - не более 0,1-0,4 дБ/м, что действительно мало для поликристаллических световодов среднего ИК-диапазона - через разработанные на кафедре физической и коллоидной химии ХТИ УрФУ ИК-световоды, являющиеся, по сути, идеальным фильтром пространственных частот.

Метод обнуляющей интерферометрии может реализоваться за счет определенного расположения системы пассивно охлаждаемых телескопов, запущенных в космос, в идеале – во вторую точку либрации (точка Лагранжа L2), находящуюся на расстоянии порядка  $1,5 \cdot 10^9$  м от Земли на прямой «Земля-Солнце» в направлении от Солнца. Это положение, вследствие равенства орбитальных периодов Земли и объекта в точке L2, позволяет легко производить экранирование и калибровку такого объекта, при этом солнечная радиация частично блокируется. Тем не менее, излучение звезды все же присутствует, поэтому для осуществления исследований необходимо подбирать материалы, не чувствительные либо в малой степени чувствительные к широкому диапазону излучения, особенно к коротковолновым, т.е. высокочастотным его видам. Основным рабочим элементом модового фильтра является отрезок волокна, работающего в одномодовом режиме.

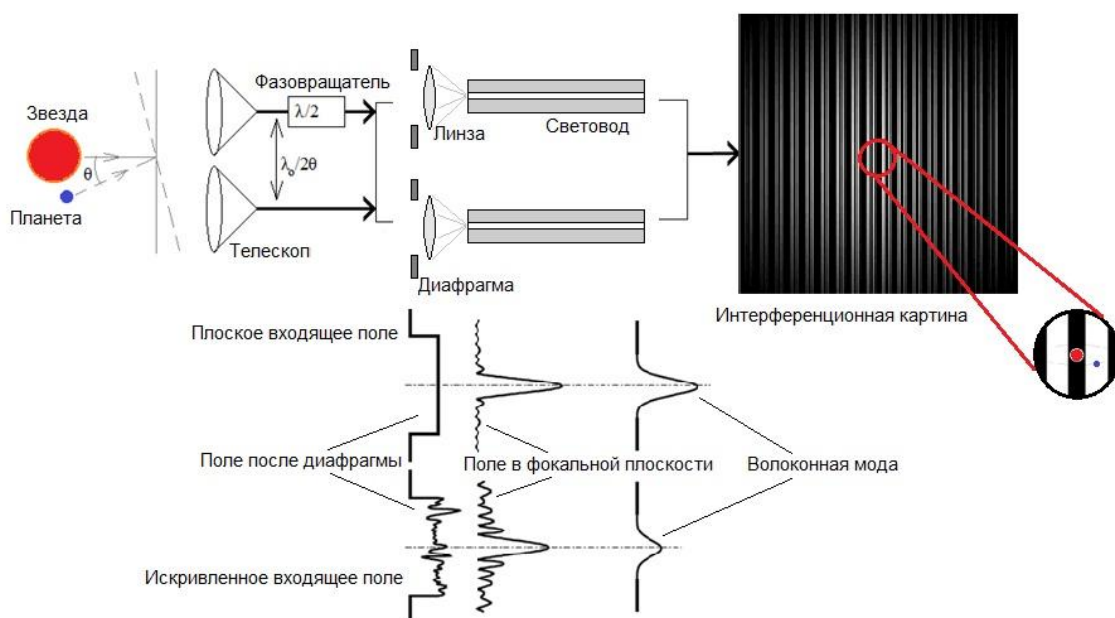


Рис. 1. Схема и принцип работы обнуляющего интерферометра Брейсуэлла с использованием модового фильтра [8-10]

Это может быть как двухслойный (1D) нано- либо микроскристаллический инфракрасный световод, так и так называемый микроструктурированный световод с увеличенным диаметром поля моды (2D). Схематически на примере двухслойного световода работу фильтра можно представить следующим образом (рис. 1). Видно, что за счет определенного расположения телескопов и за счет отставания по фазе каждого второго пучка падающих волн излучение звезды претерпевает гасящую интерференцию, а планеты - усиливающую.

## 2. Моделирование ИК-световодов

Для сокращения временных и материальных затрат при производстве кристаллических ИК-световодов было решено использовать компьютерное моделирование их структуры, в частности, в программе SMTP для Matlab [11]. Цель моделирования по этой методике – определить модовый состав и визуализировать волноводные моды, распространяющиеся по световоду, с выводом полного перечня эффективных показателей преломления  $n_{\text{eff}}$ , соответствующих картинам поля моды. Под  $n_{\text{eff}}$  понимается некий усредненный ПП, соответствующий интенсивности излучения, распределенной на единице площади поперечного сечения световода. Входными данными при моделировании являются геометрические характеристики световодов (сама структура воспроизводится в любом графическом редакторе), рабочая длина волны и показатели преломления основных материалов световода.

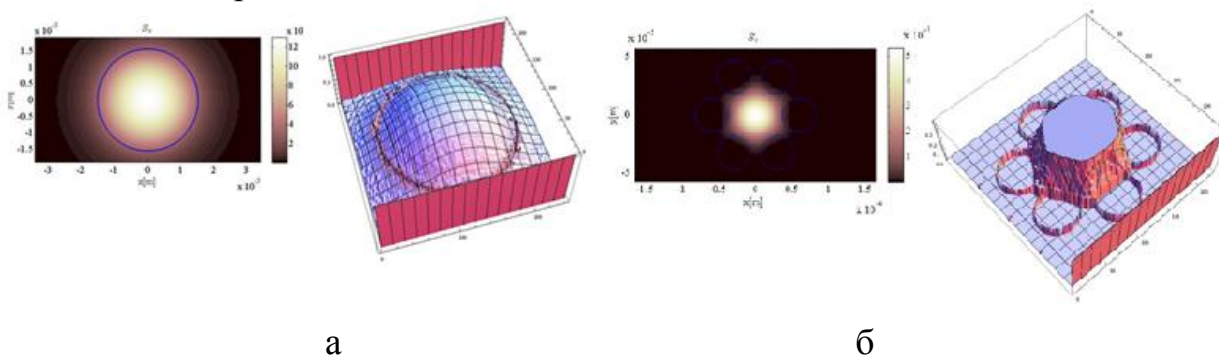


Рис. 2. Двумерная (SMTP) и трехмерная (WM) модели картины поля моды для одномодовых световодов,  $\lambda=10,6$  мкм: а) 1D,  $d_{\text{core}}=31$  мкм,  $n_{\text{eff}} = 2,215$ ; б) 2D,  $d_{\text{core,eff}} = 98$  мкм,  $n_{\text{eff}} = 2,204$ .

Так как световоды, применимые в схеме обнуляющей интерферометрии, могут иметь как двухслойную 1D-структуру, так и 2D-структуру с увеличенным диаметром поля моды, в данной работе проводилось моделирование именно этих структур. Конечной целью было определение такого соотношения вышеуказанных входных параметров, при котором по световоду распространялась бы одна фундаментальная мода  $LP_{01}$  (рис. 2).

В технологии широко известных кварцевых световодов (0,2 – 2,0 мкм) применяются различные фотонные структуры, представляющие собой в самом сложном случае структуры переменного состава либо из цилиндрических поверхностей, ось которых совпадает с главной продольной осью световода, либо из матрицы с сотнями и тысячами вставок либо отверстий (они формируют фотонные запрещенные зоны – ФЗЗ – области, в которые свет не может «заходить»). Оба случая ведут к изменению показателя преломления (ПП) материала, что обуславливает само распространение излучения по световоду. В случае световодов из галогенидов серебра технологически сложно создать структуры с большим количеством элементов с разным ПП, поэтому мы использовали предельные случаи – двухслойные 1D-световоды и 2D-структуры с одним рядом из 6 вставок. Двумерные изображения для простоты интерпретации переводились в трехмерные в программе Wolfram Mathematica.

## 2.1. Моделирование 1D-фотонных структур

Для моделирования двухслойных одномодовых световодов была выбрана структура с диаметром сердцевины 31 мкм (диаметр оболочки  $d_{\text{clad}}$  не учитывается, но при получении он принимается равным 700 мкм, исходя из набора имеющихся в наличии фильер для экструзионного пресса). Для выбранной структуры перебирались разные соотношения показателей преломления до получения картины поля моды на рис. 3 (справа), соответствующей гауссовому распределению интенсивности излучения, что означает, что в смоделированном световоде поддерживается мода низшего порядка, отвечающая передаче большой мощности в реальном световоде. На рис. 3 приведена часть результатов моделирования для диапазона ПП от 2,1 до 2,2, что соответствует составу AgBr-TlI с содержанием иодида таллия от 1 до 2 мольных процентов (определено методом Майкельсона).

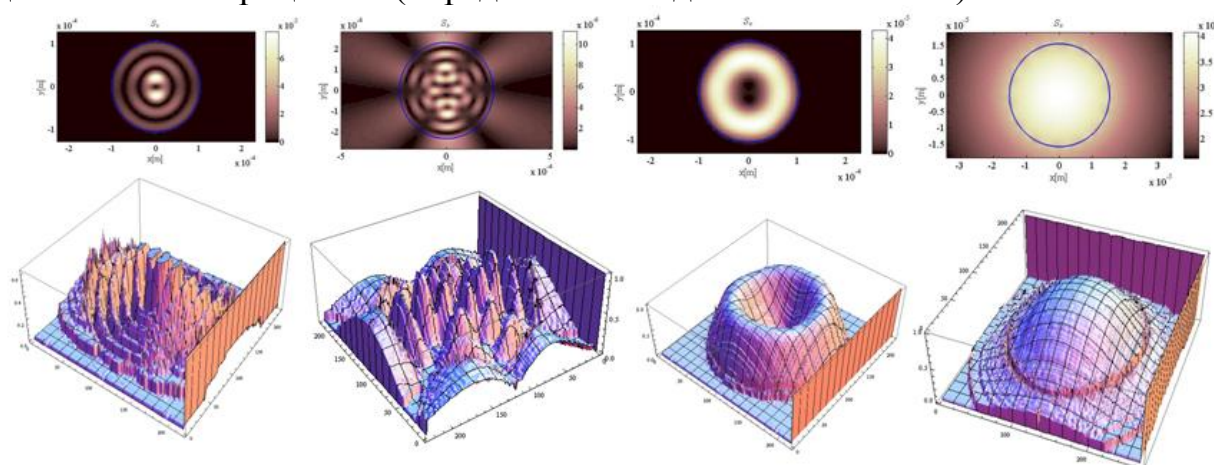


Рис. 3. Процесс моделирования 1D-световода;  $\lambda=10,6$  мкм,  $d_{\text{core}}=31$  мкм.



## 2.2. Моделирование 2D-фотонных структур

Более сложным является моделирование двумерных фотонных структур. Для их моделирования были выбраны значения ПП в диапазоне 2,21...2,28 с разницей ПП между матрицей и вставками от 0,001 до 0,005, а также 0,01. Были выбраны несколько геометрий, из которых на данный момент получены результаты для двух. Их характеристики – диаметры вставок  $d_i$ , диаметры сердцевин  $d_{core,eff}$  и межвставочные расстояния  $\Lambda_i$  – сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Смоделированные геометрии 2D-световодов			
№ п/п	$\Lambda_i$	$d_i$	$d_{core,eff}$
1	80	60	100
2	100	75	125

Для каждой геометрии произведено свыше 40 актов моделирования. Результаты приведены на рис.4. Замечено, что для разницы ПП в 0,002 почти всегда получается четко выраженная мода в терминах программы SMTP, но на самой картине поля моды интенсивность излучения мала и сконцентрирована на границе вставка-матрица. Для структуры с наименьшей оптической плотностью для указанной разницы ПП не было найдено мод. Большинство актов моделирования не привело к выявлению одномодового режима, однако при минимальной разнице ПП в одну (изредка две или три) тысячную все же была получена одна невытекающая мода (отмечена красной точкой на графиках на рис. 4).

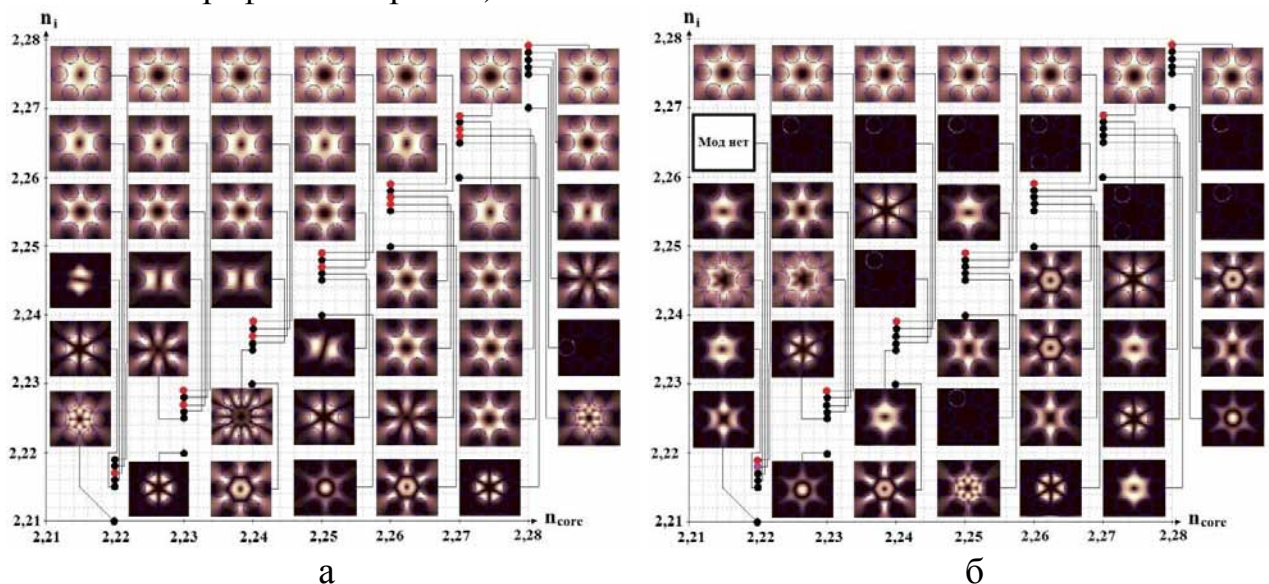


Рис. 4. Результаты SMTP-моделирования 2D-структур,  $\lambda=10,6$  мкм. Геометрия указана в табл. 1 (а - №1, б - №2). Красные точки соответствуют формально одномодовому режиму (с кольцевой  $LP_{31}$ -модой), черные - многомодовому режиму, фиолетовая точка – отсутствие мод.

Однако данная мода имеет ось симметрии третьего порядка (с учетом магнитной и электрической составляющих световой волны). Она изображена

на рис. 5 вместе с примерами некоторых других трехмерных интерпретаций найденных мод для первого случая.

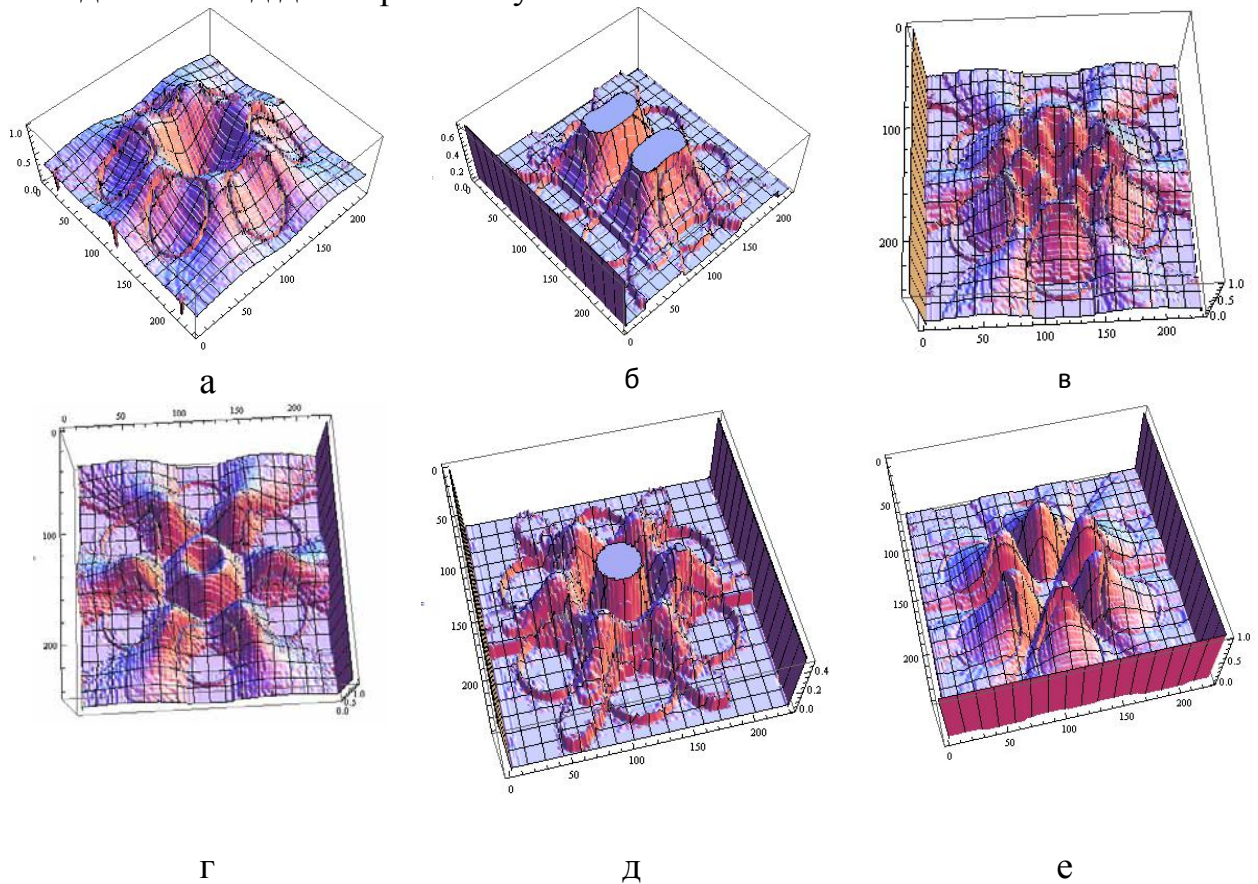


Рис. 5. Трехмерная интерпретация некоторых результатов моделирования 2D-структуры первого типа (табл. 1): а)  $LP_{31}$ :  $n_{\text{mat}} = 2,2300$ ;  $n_i = 2,2290$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,2291$ ; б)  $LP_{11}$ :  $n_{\text{mat}} = 2,2300$ ;  $n_i = 2,2260$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,2292$ ; в)  $LP_{32}$ :  $n_{\text{mat}} = 2,2200$ ;  $n_i = 2,2100$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,2106$ ; г) неканоничная мода, напоминающая переход от  $LP_{02}$  к  $LP_{32}$ :  $n_{\text{mat}} = 2,220$ ;  $n_i = 2,210$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,215$ ; д) аналогично:  $n_{\text{mat}} = 2,2500$ ;  $n_i = 2,2400$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,2467$ ; е) четко выраженная  $LP_{31}$ :  $n_{\text{mat}} = 2,2700$ ;  $n_i = 2,2650$ ;  $n_{\text{eff}} = 2,2653$ .

Несмотря на отрицательный результат при поиске мод нужно учесть два аспекта:

1. Выбранная геометрия, очевидно, не является искомой; необходимо произвести моделирования прочих вариантов структур с другим соотношением  $d_i/\Lambda_i$ , что является предметом будущих исследований;

2. Алгоритм SMTP не учитывает длину световода и нелинейные эффекты: в самом деле, благодаря самофокусировке на определенной длине световода лазерное излучение способно «занять» сердцевину, избавившись от вытекающих через оболочку мод и сконцентрировав максимум своей энергии на продольной оси волокна. Поэтому можно полагать, что на практике уже смоделированные 2D-световоды гипотетически могут работать в одномодовом режиме с модовым составом  $LP_{01}$ , хотя моделирование показывает  $LP_{06}$ -моду. Но это требует как определенной длины световода (искомые волокна априори не обладают большой длиной относительно

кварцевых), так и подкрепляющих опытов, поэтому предпочтительнее все же продолжить моделирование до выявления фундаментальной моды  $LP_{01}$ .

### 3. Экструзия и исследование свойств ИК-световодов

Методом экструзии из аттестованных кристаллов были получены образцы ИК-световодов систем AgCl-AgBr (для отработки режима) и AgBr-Tl. Вследствие того, что использованные здесь экструзионные фильеры, задающие способ вытягивания и внешнюю геометрию световода, не были опробованы ранее, сначала планируется отработать экструзию именно двухслойных световодов, а потом уже испытывать способ на световодах со вставками. В частности, был получен световод состава AgBr-Tl с трехпроцентным содержанием иодида таллия. Температура экструзии составила 190 °С, давление на монокристаллическую заготовку - 800 МПа.

Структура среза световода была исследована на металлографическом микровизоре со стократным увеличением. Проведена полировка торцов с тем, чтобы излучение не рассеивалось и не поглощалось на неровностях среза, что необходимо как при эксплуатации световода, так и при определении спектрального диапазона пропускания (следующий шаг). Пошаговые результаты процесса торцовки изображены на рис. 6. Полировка производилась стеклянным и керамическим резцом. По микрофотографиям соответствующих торцов на рис. 7(а) видно, что керамический резец имеет недостатки вследствие зазубренности лезвия.

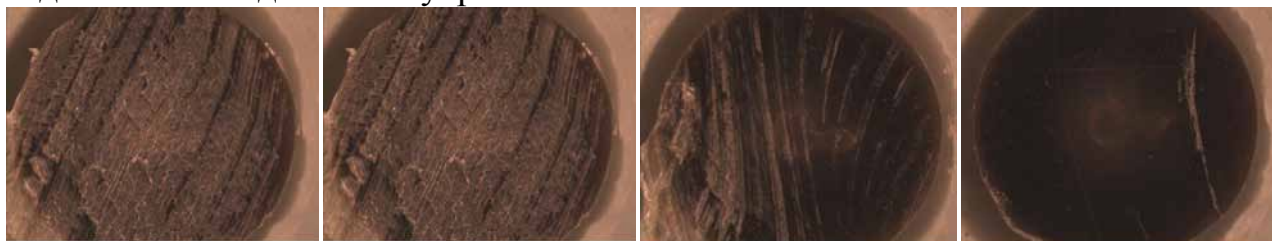


Рис. 6. Торец световода в процессе торцовки,  $\mu$ Vizo MET-221,  $\times 100$

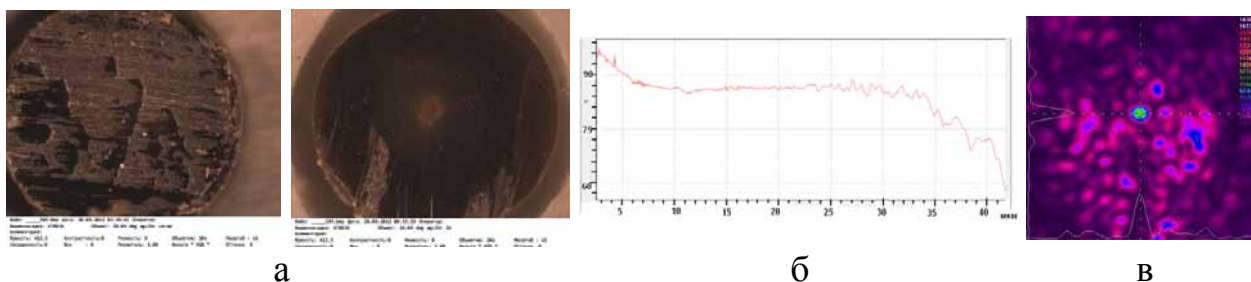


Рис. 7. Сравнение торцовки керамическим (слева) и стеклянным (справа) резцами (а); спектр пропускания световода состава core/clad:  $Ag_{0,97}Tl_{0,03}Br_{0,97}I_{0,03}/AgCl_{0,25}Br_{0,75}$  (б), снятый на Shimadzu IRPrestige-21; распределение излучения на выходе из торца световода (в).

Для определения спектрального пропускания был использован ИК-Фурье спектрометр. Пропускание полученного световода составило



порядка 40 мкм. Спектр приведен на рис. 7(б). Сам ИК-спектрометр имеет рабочий диапазон от 1,28 до 41,6 мкм.

Одномодовый режим подтвержден съемкой излучения ( $\text{CO}_2$ -лазер,  $\lambda=10,6$  мкм) на выходе из торца вышеупомянутого световода с помощью CCD камеры SPIRICON Pygocam III. Расстояние до камеры – 38 см. Результат представлен на рис. 7(в). Из рисунка видно, что интенсивность распределения излучения подчиняется нормальному закону распределения, что говорит о распространении  $\text{LP}_{01}$ -моды по сердцевине световода.

Подобные исследования для световодов 2D-структуры будут проведены после отработки режимов экструзии световодов с увеличенным диаметром поля моды, а также после компьютерного моделирования, выявившего распространение по световоду фундаментальной моды.

## Заключение

Из изучения принципа действия интерферометра Брейсуэлла можно заключить, что рабочей частью модового фильтра может являться световод, работающий в одномодовом режиме, т.е. световод 1D- либо 2D-структуры. Моделирование в пакете SMTP позволяет предсказать режим работы любого световода заданной структуры и выбрать набор параметров, который в данном случае обеспечил бы одномодовый режим, а точнее поддержал бы распространение низшей  $\text{LP}_{01}$ -моды, являющейся мощным и не размытым по времени сигналом, что важно во всех областях применения оптических волокон, а в данном случае – в схеме нуллера. Для одномерных структур такой набор выявлен. Для двумерных он будет выявлен в ходе дальнейших исследований, которые позволят «избежать» проявление моды с осью симметрии третьего порядка. Полученные одномерные двухслойные световоды работают в одномодовом режиме, что доказано распределением энергии, снятым на камеру SPIRICON на длине волны 10,6 мкм, и пропускают в широком спектральном диапазоне – до 40 мкм, что подтверждено с помощью ИК-Фурье спектрометра. Широкий диапазон проходящих длин волн соответствует достаточно широкому температурному интервалу, в котором излучают планеты, включая излучение землеподобных экзопланет. Опираясь также на исследованные ранее свойства подобных световодов [3,4,9], такие как повышенная устойчивость к излучению в очень широком спектральном диапазоне, относительно малые оптические потери на длине волны 10,6 мкм, негигроскопичность, можно заключить, что кристаллические ИК-световоды на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам модовых фильтров в обнуляющей интерферометрии.

По результатам исследований световодов применительно к схеме Брейсуэлла была опубликована статья «ИК-световоды нано- и микрокристаллической структуры для обнуляющей интерферометрии» в журнале «Бутлеровские сообщения», Т.34. № 6. с. 118-123.

## Список использованных источников

- [1] Научные труды Гиредмета. Исследование процессов получения солей и выращивание монокристаллов галогенида таллия. М.: Металлургия. 1970. Т. 29. 159 с.
- [2] Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. «Оптические материалы для инфракрасной техники». Справочное издание. М.: Наука. – 1965. 336 с.
- [3] Зелянский А.В., Жукова Л.В., Китаев Г.А. «Растворимость AgCl, AgBr в галогеноводородных кислотах». Неорганические материалы. 2001. Т. 37. № 5. С. 523-526.
- [4] Корсаков А.С., Жукова Л.В. Кристаллы для ИК-волоконной оптики. Физико-химические основы получения твердых растворов галогенидов серебра и таллия (I) для ИК-волоконной оптики. LAP Lambert academic publishing. 146 с. 2011.
- [5] L. Zhukova, A. Korsakov, A. Chazov, D. Vrublevsky, V. Zhukov. «Photonic crystalline IR fibers for the spectral range of 2-40  $\mu\text{m}$ ». Applied Optics. 2012. Vol.51. No.13. P. 2414-2418.
- [6] A. Chazov, A. Korsakov, L. Zhukova, D. Vrublevsky, V.Korsakov, V.Zhukov. «Modeling and experimental research of nano- and microstructurized IR fibers (2-40  $\mu\text{m}$ ) based on defective crystals». Advanced Photonics Congress, Nonlinear Photonics Conference, OSA Technical Digest (online), Specialty Optical Fibers (SOF) 2012, paper: Stu3F.3, 17-21 June 2012, Colorado Springs, Colorado, USA.
- [7] Патент РФ № 2284044. Жукова Л.В., Шульгин Б.В., Жуков В.В. и др. «Кристаллический сцинтиллятор Лия-3». Заявл. 13.05.2005. Опубл. 20.09.2006. Бюл. № 26.
- [8] Wallner O., Leeb W.R., Flatscher R. «Design of spatial and modal filters for nulling interferometers». SPIE Proc. 2003. V. 4838. P. 668-679.
- [9] Ksendzov A., Lewi T., Lay O.P., Martin S.R., Gappinger R.O., Lawson P.R., Peters R.D., Shalem S., Tsun A., Katzir A. «Modal filtering for midinfrared nulling interferometry using single mode silver halide fibers». Applied Optics. 2008. Vol. 47. No. 21. P. 5728-5735.
- [10] Flanagan J.C., Richardson D.J., Foster M.J., Bakalski I. «A microstructured wavefront filter for the Darwin nulling interferometer». Proc. '6th Internat. Conf. on Space Optics', ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006 (ESA SP-621, June 2006).
- [11] Hochman, Y. Leviatan. Analysis of strictly bound modes in photonic crystal fibers by use of a source-model technique. J. Opt. Soc. Am. A. 2004. Vol.21. No.6. P.1073-1081.